

	<p style="text-align: center;"><i>Analyse du largage aéroporté</i></p> <p style="text-align: center;">Sohier</p> <p style="text-align: center;">Henri</p> <p style="text-align: center;">3^{ème} année</p> <p style="text-align: center;">DCPS/DCSD</p> <p>Mél. : henri.sohier@onera.fr Tél. : 05 62 25 29 39</p>
--	---

Directeur(s) de thèse : Hélène Piet-Lahanier (DCPS Palaiseau), Jean-Loup Farges (DCSD Toulouse)

Encadrants : Jean Oswald (CNES/DLA), Hadrien Lambaré (CNES/DLA)

Site : Toulouse

Thèse financée par : CNES/DLA / ONERA

Mots clés : largage, séparation, trajectoires, risque, collision, analyse de sensibilité, Sobol, Morris

Contexte

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une étude technique du CNES (Centre National d'Études Spatiales) et de l'Onera sur la mise en orbite de satellites par largage aéroporté. Contrairement au lancement classique de satellites réalisé depuis une base au sol, le largage aéroporté consiste à d'abord amener le lanceur à une certaine altitude à l'aide d'un porteur de type avion. Le largage aéroporté vise le marché des micro et nano satellites qui sont normalement emportés en charges secondaires dans un lanceur classique. Le satellite principal avec lequel un micro/nano satellite est lancé impose d'importantes contraintes. L'avantage du lancement aéroporté est d'abord de pouvoir offrir un calendrier et une trajectoire plus flexibles à ces micro/nano satellites. Le largage aéroporté permet aussi de sortir plus facilement de la couche la plus basse de l'atmosphère qui est aussi la plus dense. Un programme de largage aéroporté serait également moins coûteux, et pourrait permettre de mieux faire face à certains problèmes comme les intempéries en rendant possible un changement de site de lancement. Différents projets et programmes reposent sur le concept de largage aéroporté: le projet EOLE (Figure 1) dont fait partie cette thèse, le projet Aldebaran du CNES où le porteur était un Rafale, le programme Pegasus de la NASA qui procède à environ un lancement par an, le projet de largage aéroporté de l'agence militaire américaine DARPA, ou encore SpaceShipOne de Virgin Galactic pour du vol suborbital. Dans chacun de ces projets, la phase de largage est extrêmement importante.



Figure 1 – Démonstrateur EOLE en vol

Objectifs Scientifiques

Les objectifs scientifiques se dessinent au travers du travail initial sur les similitudes. Le principe de similitude consiste à adimensionner les dynamiques en jeu. Son intérêt est lié au fait que deux phénomènes a priori différents peuvent être ramenés au même problème une fois adimensionnés. Une maquette peut ainsi être utilisée pour recalculer un paramètre qui peut aussi être utilisé à une autre échelle. Le recalage d'un paramètre impose un travail disciplinaire sur une dynamique apparaissant comme intéressante, imparfaitement caractérisée, mesurable par de nouveaux outils, et en condition de similitude. L'analyse disciplinaire de la dynamique à recalculer doit être d'autant plus précise en cas d'importantes limites en matière de similitude. Différentes questions de nature multidisciplinaire se sont alors posées. Quelles sont les dynamiques importantes au largage? Comprendre leur rôle peut-il permettre de définir une meilleure trajectoire de largage ?

Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus

La littérature sur le largage fait apparaître deux grands types de travaux. Il existe d'une part des travaux en analyse de risque où des configurations sont aléatoirement testées pour obtenir une probabilité d'échec globale, sans distinguer les dynamiques en cause. Il existe d'autre part des études disciplinaires poussées, portant par exemple sur la détermination des interactions aérodynamiques, mais où le nombre de dynamiques considérées est limité. Il est donc apparu intéressant d'appliquer au largage un outil mathématique, l'analyse de sensibilité. Cette analyse permet précisément de déterminer l'influence de différents facteurs sur la sortie d'une fonction. La première étape consiste à définir la fonction étudiée, ainsi que les facteurs desquels elle dépend. Il est choisi d'étudier la distance minimale entre le porteur et le lanceur durant la séparation. Les facteurs correspondent aux paramètres de la simulation. Celle-ci a été développée sous Matlab en intégrant différents problèmes et recommandations apparaissant dans la littérature sur le largage. La simulation prend ainsi en compte la possibilité de turbulences, d'interactions aérodynamiques, les incertitudes sur les forces d'éjection, sur la répartition de masse, ou encore sur l'ouverture des crochets. La commande du porteur est assurée par un contrôleur pseudo-6ddl qui permet de reproduire la dynamique associée à un contrôleur réaliste. Comme dans d'autres travaux, le système est représenté par des géométries élémentaires. Sous le porteur, trois plans limités permettent de définir une zone de séparation considérée comme sûre. La Figure 2 présente le modèle Matlab correspondant. Le problème de crochet, qui correspond au cas où les deux crochets reliant le lanceur au porteur ne s'ouvrent pas exactement en même temps, est modélisé à l'aide d'une liaison rotule. La force de liaison est calculée à l'aide des théorèmes fondamentaux de la dynamique mais le système à résoudre est aussi rendu plus complexe par le contrôleur pseudo-6ddf.

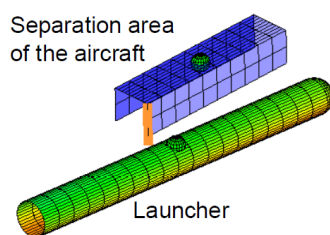


Figure 2 – Rendu Matlab

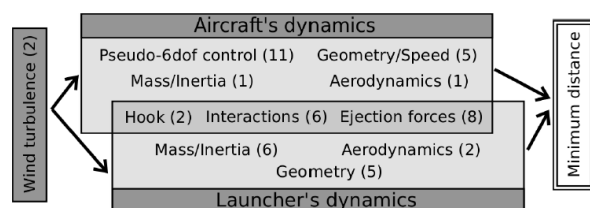


Figure 3 – Facteurs intervenant dans la simulation

Au total, la simulation fait intervenir 49 facteurs, comme résumé en Figure 3. Pour effectuer une analyse de sensibilité, la méthode la plus fréquemment utilisée est celle de Sobol. Il s'agit d'une méthode par analyse de variance, ou ANOVA, qui est précise mais nécessite de nombreuses évaluations. Elle n'est donc pas adaptée au cas étudié en raison du nombre élevé de facteurs à prendre en compte et de la durée non négligeable de la simulation. Une analyse rapide basée sur peu d'échantillons, appelée screening, peut typiquement être utilisée pour identifier des facteurs peu influents à laisser de côté dans la méthode de Sobol. La méthode de Morris est par exemple une solution de screening qui fait l'objet d'un intérêt grandissant. Elle est basée sur le moyennage de résultats obtenus en faisant varier un facteur à la fois (variations OAT). Elle est qualifiée de qualitative mais est très peu coûteuse. La méthode de Morris a été construite sur le principe de trajectoire. Une trajectoire

commence à un point choisi aléatoirement dans un hypercube des quantiles discrets, où chaque dimension correspond à la fonction de répartition d'un facteur. Ce point initial est noté A dans la figure 4. La variation d'un facteur conduit à un nouveau point B, où un autre facteur est ensuite varié, et ainsi de suite. Chaque variation permet d'estimer l'influence du facteur sur la sortie, la moyenne des résultats obtenus pour chaque facteur avec plusieurs trajectoires est calculée.

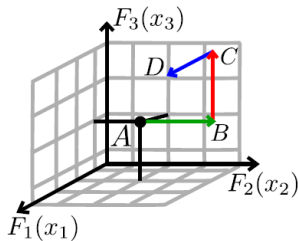


Figure 4 – Trajectoire

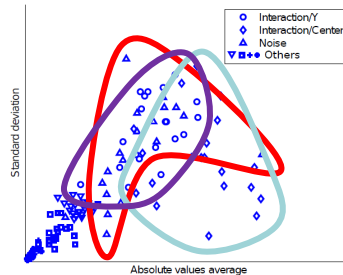


Figure 5 – Influence d'un facteur multidimensionnel

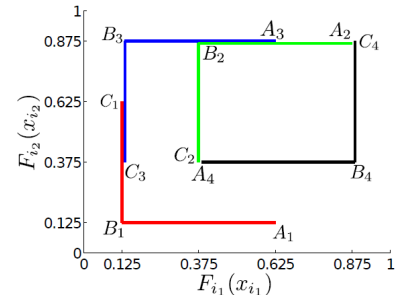


Figure 6 – Trajectoires non-représentatives

Un important problème apparaît toutefois dans de nombreux travaux et ce dans différents domaines. Il est fréquent de vouloir connaître l'influence de l'incertitude qui existe sur un groupe valeurs. Par exemple, en géographie, de nombreux travaux tentent d'évaluer l'influence de l'incertitude sur l'ensemble des points d'une carte. La méthode de Morris ayant été développée pour des facteurs scalaires, il est seulement possible de calculer l'influence de l'incertitude de chaque point, séparément. En plus d'être fastidieux, les résultats sont dans ce cas généralement quasi-nuls, même lorsque l'influence globale des facteurs est grande. L'enjeu est important car sous-estimer un facteur important conduit à des calculs erronés, et sur-estimer un facteur négligeable conduit à des calculs inutiles. Le largage est fait également face à ce problème, car l'un des facteurs correspond au bruit blanc utilisé avec le modèle de Dryden. Un tel bruit blanc comporte une valeur à chaque pas de temps, et il est intéressant d'évaluer l'influence de l'ensemble de ces valeurs. Un facteur rassemblant ainsi un groupe de valeurs a été appelé dans cette thèse « facteur multidimensionnel ». Des réalisations aléatoires sont généralement utilisées pour les facteur multidimensionnel, mais aucune méthode n'a clairement été définie, et les conséquences d'une telle adaptation de la méthode de Morris n'ont jamais été discutées.

Pour souligner les problèmes posés, quatre trajectoires ont été générées et utilisées vingt fois sur une simulation simplifiée du largage ne comportant que sept facteurs. La Figure 5 est une représentation classique des résultats, avec en abscisse la moyenne des valeurs absolues obtenues avec les différentes trajectoires, et en ordonnées l'écart type qui permet d'évaluer une non-linéarité ou une interaction. En principe, les trajectoires étant les mêmes, les résultats devraient être identiques et la Figure 5 ne devrait faire apparaître qu'un point par facteur. Pourtant, 20 points différents apparaissent pour chaque facteur. Les points correspondant aux trois facteurs principaux sont entourés, révélant d'importantes variations. Le facteur multidimensionnel, représenté par des triangles, n'est par ailleurs pas le seul à varier à cause des interactions. Vingt pour cent des résultats obtenus peuvent être considérés comme incorrects, c'est à dire ne permettant pas d'identifier les trois facteurs les plus importants. Différentes règles ont été définies pour mieux contrôler les risques liés aux facteurs multidimensionnels, notamment le doublement des calculs permettant d'estimer la variation des points, la vérification des histogrammes et la vérification des corrélations entre échantillons. D'autres outils ont été développés, notamment pour prendre en compte l'incertitude sur l'amplitude ou mieux comprendre les sous-parties du facteur multidimensionnel les plus importantes. Ce travail a été accepté pour publication à l'Aerospace Conference de la IEEE.

La Figure 6 représente un autre problème que peut poser les trajectoires. Celles-ci peuvent ne pas couvrir de manière suffisamment représentative l'hypercube des quantiles. Par exemple, dans la Figure 6, les variations (B1, C1) et (B3,C3) permettent toutes les deux d'évaluer l'influence du facteur en ordonnée, mais elles sont toutes les deux calculées avec une même valeur du facteur en abscisse. Les variations (B2, C2), (B3,C3) et (B4,C4) se font elles avec les mêmes valeurs du facteurs en ordonnée, seul (B1,C1) étant différent. Il est pos-

sible d'éviter ces problèmes. il est d'abord nécessaire d'utiliser un hypercube latin discret. Ce n'est toutefois pas suffisant si le concept de trajectoire est utilisé. Il faut dans ce cas que les facteurs soient aussi modifiés dans un ordre donné. Un indicateur de la qualité des résultats de la méthode de Morris a été développé et montre que l'utilisation d'un hypercube latin fournit de bien meilleurs résultats. Il est également montré qu'il est préférable de modifier tous les facteurs à partir du point initial, plutôt que de les modifier le long d'une trajectoire. Finalement, il est aussi montré que les résultats sont largement améliorés si on effectue six modifications successives des facteurs plutôt que quatre. Les trajectoires couvrent mieux l'espace et la variabilité due aux facteurs multidimensionnels est sensiblement réduite.

D'autres améliorations de la méthode de Morris ont aussi pu être développées. Elles ont permis une analyse plus fine et moins coûteuse du largage. Leur application peut aujourd'hui être très large. Quel que soit le domaine, les simulations peuvent aujourd'hui dépendre de nombreux facteurs et avoir un temps d'exécution relativement long.

Perspectives

La pente au largage constitue un des facteurs de sensibilité. Si elle apparaît comme un facteur important, elle peut alors être exploitée pour réduire l'influence néfaste de certains facteurs tels les interactions ou les perturbations atmosphériques. Une pente optimale réduisant le plus la variance de la sortie peut être recherchée, permettant ainsi de définir une meilleure loi de commande. Il serait alors important d'évaluer si l'incertitude de la pente de largage influe ou non d'autres sorties telle que la position finale du lanceur.

Bibliographie sommaire

- A. Cenko, « Store separation lessons learned during the last 20 years », in *27th international congress of the aeronautical sciences*, 2010
- M. Lasek and K. Sibilski, « Modelling of external store separation », in *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 2002
- A. Cenko, A. Piranian, and J. Rupert, « Use of statistical tools to improve modeling and simulation of store separation », OTAN, 2004
- E. E. Covert, « Definition of safe-separation criteria for external stores and pilot escape capsule », Weapons Development Department, 1971
- M. D. Morris, « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments », *Technometrics*, vol.2, pp. 161-174, 1991
- I. M. Sobol, « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, pp. 271-280, 2001
- A. van Griensven, T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio, and R. Srinivasan, « A global sensitivity tool for the parameter of multi-variable catchment models », *Journal of Hydrology*, vol. 324, pp. 10-23
- A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Rattor, « Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models », Wiley, 2004
- B. N. Pamadi, T. A. Neirynck, N. J. Hotchko, P. V. Tartabini, W. I. Scallion, K. J. Murphy, and P. F. Covell, « Simulation and analyses of stage separation of two-stage reusable launch vehicles », in *AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies*, 2005
- G. PUJOL, « Simplex-based screening designs for estimating metamodels », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, pp. 1156-1160, 2009

Liste des communications (préciser à chaque fois : acceptées, soumises, prévues)

- 2014 IEEE Aerospace Conference
Adaptation of the Morris Method to Multi-Dimensional Factors for Air-Launch-to-Orbit Separation
Henri Sohier, Jean-Loup Farges, Hélène Piet-Lahanier, Acceptée
- The 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control
Improvement of the Representativity of the Morris Method for Air-Launch-to-Orbit Separation
Henri Sohier, Jean-Loup Farges, Hélène Piet-Lahanier, Soumise